



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

اثر متغیرهای متالورژیکی بر عیوب ریختگی قطعات چدن نشکن

حسام نورمحمدی عمران^۱، پیمان عمرانیان محمدی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، واحد مهندسی، شرکت فولادین ذوب آمل، آمل، مازندران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، شیمی و پلیمر، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران
* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۹۱۱۱۲۵۲۰۶۱، pomranian@bzte.ac.ir

چکیده:

تاریخ دریافت: ۰۳ آبان ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۹ آبان ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۰۸ آذر ۱۴۰۴

در این تحقیق اثر پارامترهای ریخته‌گری مانند دمای ذوب‌ریزی، کربن معادل و شرایط تغذیه‌گذاری روی کیفیت متالورژیکی قطعه صنعتی زنگوله (حذف عیوب کشیدگی و سرد جوشی) از جنس چدن نشکن مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور کربن معادل از ۴/۳ تا ۴/۵ درصد وزنی، دمای ذوب‌ریزی از ۱۳۸۰ تا ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و تغذیه‌گذاری در سه شرایط بدون تغذیه، با تغذیه بسته و تغذیه باز مورد بررسی قرار گرفتند. جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کربن معادل نزدیک به ۴/۳ درصد وزنی، دمای ذوب‌ریزی بالا برای سرد جوشی و دمای ذوب‌ریزی پایین برای عیب حفره انقباضی و شرایط استفاده از تغذیه باز مناسب‌ترین شرایط را فراهم کرد به طوری که هیچ کدام از عیوب کشیدگی و سرد جوشی در این شرایط مشاهده نشد. با افزایش دما ذوب‌ریزی از ۱۳۸۰ به ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، تعداد کره‌های گرافیتی از ۱۲۵ به ۶۰ عدد در ۱ میلی‌متر مربع رسید و اندازه آنها به طور چشم‌گیری افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی:

دمای ذوب‌ریزی،

کربن معادل،

تغذیه،

کشیدگی،

سرد جوشی.

ارجاع به این مقاله:

حسام نورمحمدی عمران، پیمان عمرانیان محمدی، اثر متغیرهای متالورژیکی بر عیوب ریختگی قطعات چدن نشکن، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، جلد ۹، شماره ۲، صفحات ۱۲۱-۱۲۹.

شناسه دیجیتال: DOI: 10.22034/frj.2025.553160.1213

۱- مقدمه

نرخ شکست و افت کیفیت قطعه شود [۵، ۶] به طوریکه در مطالعه چوکالینگام [۷] و همکاران روی عیوب احتمالی در قطعات خودرو مشخص شد که حفرات انقباضی با فراوانی بیش از ۴۰ درصد، مهمترین عیب در میان کلیه عیوب احتمالی می باشد. احتمال وقوع حفرات انقباضی به عوامل متعددی مانند استحکام قالب، دمای ذوب ریزی، ترکیب شیمیایی مذاب، تعداد کره‌های گرافیت، طراحی سیستم راهگاهی و تغذیه گذاری بستگی دارد. بنابراین پیش بینی رفتار ماده در حین انجماد پیچیده است [۸، ۹].

از جمله عوامل تأثیرگذار بر کاهش این عیوب در فرآیند ریخته‌گری، کنترل دقیق دما، کربن معادل و طراحی بهینه

چدن نشکن یا داکتیل یکی از پرکاربردترین آلیاژهای مهندسی در صنایع خودروسازی و ماشین‌آلات سنگین است که به دلیل ترکیب منحصر به فرد استحکام بالا، چقرمگی مناسب و قابلیت ریخته‌گری مطلوب، جایگاه ویژه‌ای در تولید قطعات تحت بارگذاری دینامیکی دارد [۱-۴].

یکی از قطعات مهم در سیستم تعلیق خودروهای سنگین، زنگوله است که به دلیل شکل پیچیده و عملکرد حساس آن، باید از ساختاری همگن و بدون عیوب انجمادی برخوردار باشد. در غیر این صورت، وجود نقص‌هایی نظیر حفرات انقباضی و عیب سردجوشی می‌تواند منجر به کاهش استحکام مکانیکی، افزایش

پارامتر دیگر می‌تواند منجر به تشکیل یکی و رفع دیگری شود [۱۹]. چاتراد و همکاران [۲۰] در مطالعه‌ای که روی عیوب تاثیر گذار در ریخته‌گری قطعات چدنی انجام شد، نشان دادند که در دماهای ذوب ریزی محدوده ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰°C، عیوب نیامد و سرد جوشی مشاهده می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، جاداو [۲۱] و همکاران نشان دادند که کنترل ترکیب شیمیایی و دمای مذاب به شدت روی وقوع عیب سرد جوشی موثر هستند. همچنین در مقاله فنگ و همکاران [۲۲] که احتمال وقوع سرد جوشی را در مقاطع مختلف بررسی کردند، مشخص شد که مهمترین عامل در بروز آن، دمای پایین مذاب در هنگام ذوب ریزی است.

در تحقیقات به عمل آمده در حوزه ریخته‌گری چدن نشکن، اثر پارامترهایی چون دمای ذوب ریزی، کربن معادل و شرایط تغذیه گذاری مورد بررسی قرار گرفت اما بررسی همزمان این پارامترها و اثر متقابل آن‌ها روی هم بسیار مهم بوده و کمتر به آن پرداخته شده است. بنابراین در این تحقیق، تاثیر سه پارامتر تاثیرگذار مذکور بر کیفیت قطعه زنگوله به طور هم زمان بررسی شده و راهکارهای بهینه‌سازی برای کاهش عیوب ریخته‌گری ارائه می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به بهبود کیفیت قطعات تولیدی، افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید قطعات ریخته‌گری در صنعت خودروسازی منجر شود.

۲- مواد و روش پژوهش

به منظور بررسی پارامترهای موثر بر عیوب حفره انقباضی و سرد جوشی در قطعات چدن نشکن با ضخامت دیواره کمتر از ۸ میلی متر، از قطعه پوسته زنگوله بنز و مکو استفاده شد. نقشه مهندسی این قطعه در شکل (۱) و سیستم راهگامی مورد استفاده در شکل (۲) نمایش داده شده است.

در این تحقیق، سه پارامتر اصلی شامل دمای مذاب، ترکیب شیمیایی نهایی و حالت‌های تغذیه‌گذاری به‌عنوان عوامل بالقوه مؤثر بر بروز عیوب در نظر گرفته شدند، در حالی که سایر متغیرها نظیر رطوبت ماسه قالب‌گیری، نحوه ذوب‌ریزی، اپراتور ذوب‌ریز، ارتفاع بارریزی و شرایط قالب‌گیری در طول آزمایش ثابت نگه داشته شدند. برای پارامتر دمایی ذوب ریزی، ۳ دمای ۱۳۸۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۴۰°C، ترکیب شیمیایی نهایی مذاب با کربن معادل ۴/۳، ۴/۴ و ۴/۵ درصد وزنی و حالت تغذیه‌گذاری را به صورت باز، بسته و عدم وجود تغذیه، در نظر گرفته شد. برای دسته بندی پارامترها طبق فرمول رایج در طراحی آزمایش N^m بایستی ۲۷ حالت مختلف تحت آزمایش قرار می‌گرفت، بنابراین به کمک نرم افزار Minitab18 علاوه بر کاهش تعداد شمش‌ها به ۷ عدد با تکرار ۳ بار برای هر آزمایش، تاثیر همزمان پارامترها بر کیفیت

سیستم تغذیه است [۱۰]. دمای ذوب و ریخته‌گری تأثیر مستقیمی بر نحوه پر شدن قالب و کنترل جوانه‌زنی و انجماد دارد [۱۱]. به طوری که کانو [۸] و همکاران نشان دادند که با افزایش دمای ذوب ریزی علاوه بر افزایش تعداد حفرات انقباضی، کسر حجمی حفرات از حدود ۰.۱ در دمای ۱۶۲۲ کلوبین به ۰.۵ در دمای ۱۷۷۶ کلوبین افزایش یافت [۱۲]. اما در مطالعه لانگ [۱۳، ۱۴] و همکاران روی اثر دمای ذوب ریزی بر حفرات انقباضی در آلیاژهای پایه نیکل مشخص شد که افزایش دما از ۱۴۰۰ به ۱۵۰۰ سانتیگراد، حجم حفرات انقباضی کاهش یافته و در ۱۵۰۰°C به حداقل می‌رسد. در مطالعه دیگری چولینگام [۷] و همکاران نشان دادند که حدود ۵ درصد عیوب انقباضی ناشی از ریخته‌گری در دماهای بسیار زیاد است.

کربن معادل، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در تعیین سیالیت مذاب و ویژگی‌های انجمادی چدن، نقش مهمی در کنترل ساختار میکروسکوپی و کاهش تمایل به ایجاد حفرات انقباضی ایفا می‌کند. در بررسی اثر مقدار کربن بر ایجاد حفرات انقباضی، کانو [۸] و همکاران نشان دادند که افزایش مقدار کربن معادل در ریخته‌گری چدن نشکن تا ترکیب یوتکتیک (حدود ۴.۳ درصد) باعث کاهش حجم حفرات انقباضی شده و اما افزایش آن تا بیش از ترکیب یوتکتیک باعث افزایش حجم حفرات می‌گردد. ساراجیت [۱۵] و همکاران نیز در بررسی هایشان نشان دادند که کربن معادل و عناصر آلیاژی بر میزان حفرات انقباضی موثر بوده و در واقع کنترل ترکیب شیمیایی مذاب می‌تواند باعث کاهش حفرات انقباضی و بهبود خواص مکانیکی ماده شود [۱۶]. علاوه بر این، طراحی مناسب سیستم تغذیه، از طریق تأمین مذاب کافی در مراحل پایانی انجماد، نقش بسزایی در جلوگیری از تمرکز تنش‌ها و کاهش عیوب انقباضی دارد [۱۷]. چولینگام [۷] و همکاران نشان دادند که در میان فاکتورهای موثر بر وقوع حفرات انقباضی، مهمترین دلیل به طراحی سیستم راهگامی و تغذیه گذاری مربوط می‌شود. که درصد تاثیرگذاری آن حدود ۲۳ درصد برآورد شده است. در مطالعه‌ای که تینگلی [۱۸] و همکاران روی اثر تغذیه گذاری بر چدن نشکن در شرایط مختلف انجام دادند، به وضوح اثر پارامترهای طراحی تغذیه مانند مدول ریخته‌گری و هندسه گلوبی را بر احتمال وقوع عیوب انقباضی نشان دادند.

در فرآیندهای ریخته‌گری همواره پارامترهای موثر بر حفرات انقباضی بر بروز یا عدم بروز عیب سرد جوشی نیز موثر می‌باشند. اثر پارامترهای مذکور بر روی این دو عیب گاهی مشابه بوده و گاهی متناقض عمل می‌کند به طوری که تغییر یک پارامتر می‌تواند باعث بروز یا رفع هم زمان این دو عیب شده و یا تغییر

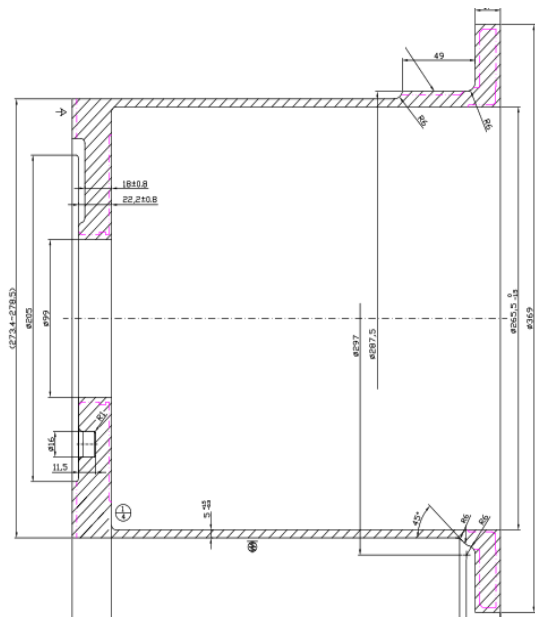
بستر مناسبی برای بررسی دقیق عیوب ریخته‌گری فراهم نمود. قالب‌ها از نوع ماسه‌تر سیلیکاتی با چسب بنتونیتی بوده‌اند که به دلیل قابلیت شکل‌پذیری بالا و هزینه پایین، برای تولید قطعات با دیواره نازک بسیار مناسب هستند. ترکیب ماسه استفاده شده برای قالب‌گیری در این تست در میکسر IRICH به صورتی در نظر گرفته شد که میزان رطوبت ماسه ۴.۳-۴.۵٪، استحکام فشاری تر (g/cm^2) ۲۱۰۰-۲۰۰۰ و تراکم ماسه عدد ۳۵ پس از انجام آزمایش‌های مربوطه با تجهیزات آزمایشگاهی برند SIMPSON اندازه‌گیری شد. در ادامه سختی قالب‌های طراحی شده برای انجام آزمایش با ثابت نگه داشتن پارامترهای قالب‌گیری دستگاه اعم از فشار کوبش و زمان مکث قالب‌گیری پس از پرس، با استفاده از دستگاه سختی‌سنج پرتابل SIMPSON اندازه‌گیری شد و برای تمام قالب‌ها (N/cm^2) ۱۵ بود. عملیات ذوب‌سازی با استفاده از کوره القایی با ظرفیت ۶ تن و فرکانس متوسط انجام شد. این کوره با توان بالا و قابلیت کنترل دقیق دما، امکان اجرای آزمایش‌های طراحی شده در دماهای ۱۳۸۰، ۱۴۰۰ و $1440^{\circ}C$ را فراهم کرد.

برای کنترل دقیق ترکیب شیمیایی مذاب، از روش طیف‌سنجی نشر نوری (OES) مطابق با استاندارد ASTM E1999 استفاده شد. این آنالیزها به صورت پیوسته در حین ذوب‌سازی انجام شد تا در صورت نیاز، اصلاحات لازم در ترکیب مذاب اعمال گردد. عملیات نشکن‌سازی مذاب به روش مرسوم ساندویچی با نسبت منیزیم به ذوب ۱/۴ درصد وزنی انجام شد تا گرافیت‌کروی پایدار در ساختار نهایی قطعه حاصل شود. فرآیند ذوب‌ریزی به صورت دستی با استفاده از پاتیل قوری ۸۰۰ کیلویی انجام شد.

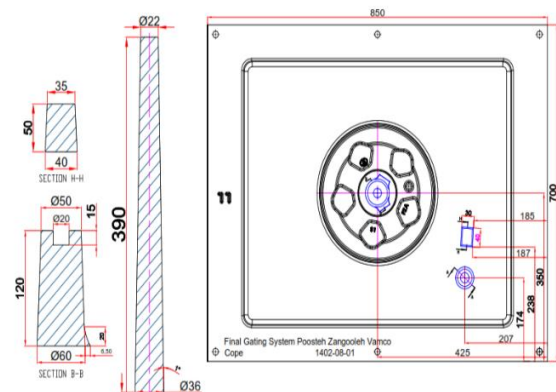
پایه دمای مذاب در حین فرآیند ذوب‌ریزی با استفاده از ترموکوپل تماسی میکروپروسسوری قابل‌حمل (MPP) مدل R انجام شد. ترکیب شیمیایی مذاب در این آزمایش‌ها به صورتی که در جدول ۱ آمده است، تنظیم شد.

در ادامه جهت حصول اطمینان از تشخیص صحیح عیوب انقباضی از سایر عیوب با ظاهر مشابه مانند حفرات گازی از میکروسکوپ الکترونی (SEM, JEOL JSM-6390) و (EDS, Oxford Inca, Oxford Instruments) استفاده شد.

شمش‌های آزمایشی تولید شده به صورت W1-W7 نام‌گذاری شدند. و پارامترهای هر یک از این شمش‌ها شامل دمای ذوب‌ریزی، کربن معادل و نوع تغذیه‌گذاری در جدول ۲ آمده است. همچنین برای بررسی اثر دمای ذوب‌ریزی روی تعداد کره‌های گرافیتی و همچنین میزان کرویت گرافیت‌ها، شمش‌های به دست آمده در دماهای مختلف تحت آزمایش متالوگرافی قرار گرفتند.



شکل ۱. نقشه مهندسی قطعه پوسته زنگوله (واحد: میلی‌متر)



شکل ۲- سیستم راهگاهی مورد استفاده در ریخته‌گری قطعه زنگوله

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مذاب

عنصر	درصد وزنی
کربن	۳.۶-۳.۸٪
سیلیسیم	۲.۲-۲.۵٪
منگنز	۰.۲-۰.۳٪
فسفر	<۰.۰۵٪
گوگرد	<۰.۰۲٪
منیزیم	۰.۰۳-۰.۰۵٪

قطعات بررسی شد. در این تحقیق، فرآیند قالب‌گیری قطعات بر روی خط اتوماتیک HWS با ابعاد درجه $300 \times 750 \times 900$ میلی‌متر انجام گرفت. این خط با قابلیت تولید قالب‌های ماسه‌تر با دقت بالا، سرعت مناسب و سیستم تغذیه‌گذاری کنترل‌شده،

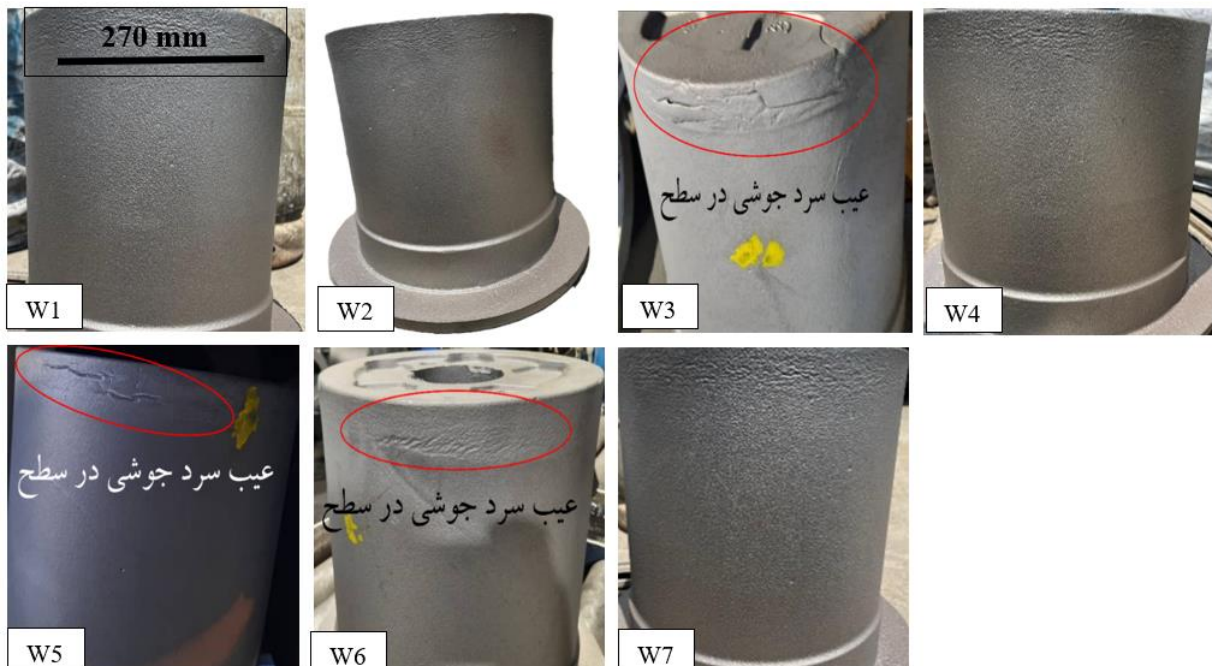
گازها، به دلیل تراکم بالا در مسیر خروجی قالب، در میان ذرات ماسه محبوس شده و موجب اعمال مقاومت دینامیکی در مقابل پیشروی مذاب می شود که ناشی از تراکم گاز است. در نتیجه، برخورد متقابل مذاب با گازهای محبوس در ناحیه انتهایی قالب، زمینه‌ساز بروز عیب سردجوشی و ایجاد نواحی پوسته ای در بخش فوقانی قطعه ریختگی خواهد بود. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تغذیه‌ی باز، علاوه بر ایفای نقش در تأمین مذاب طی مرحله انجماد ثانویه، عملکرد مؤثری در تسهیل خروج گازهای محبوس از قالب داشته و در کاهش احتمال بروز عیوب مرتبط با سردجوشی تأثیرگذار بوده است در ادامه بررسی‌ها تحلیل شمش‌های W4 تا W7 نشان‌داد که افزایش دمای ذوب‌ریزی از 1400°C به 1440°C منجر به کاهش احتمال وقوع عیب سردجوشی می‌گردد. این یافته با فرض اولیه مبنی بر تأثیر منفی دمای پایین بر تشکیل این نوع عیوب هم‌راستا بوده و انتظار می‌رفت که در این محدوده دمایی، عیب مذکور در شمش‌ها مشاهده نشود. با این حال، نتایج حاصل از شمش‌ها W5 و W6 نشان داد که علیرغم افزایش دما، عیب سردجوشی همچنان رخ داده است. این موضوع بیانگر آن است که طراحی سیستم تغذیه و وجود یا عدم وجود آن، نقش کلیدی در کنترل و پیشگیری از این نوع عیوب ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، افزایش دمای ذوب‌ریزی به‌تنهایی برای حذف کامل عیب سردجوشی کافی نبوده و شرایط هندسی و عملکردی تغذیه نیز باید به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی گردد. در نتیجه، می‌توان چنین استنباط کرد که هرچند دمای بالای مذاب یکی از عوامل مؤثر در

جدول ۲- دسته بندی شمش‌های آزمایشی

شماره شمش	کربن معادل ($\%W_t$)	دمای ذوب‌ریزی ($^{\circ}\text{C}$)	حالت تغذیه
W1	4.5	1380	تغذیه باز
W2	4.3	1380	تغذیه باز
W3	4.4	1380	تغذیه بسته
W4	4.5	1400	تغذیه باز
W5	4.3	1440	تغذیه بسته
W6	4.4	1440	بدون تغذیه
W7	4.3	1440	تغذیه باز

۳- نتایج و بحث

پس از تهیه و بررسی ظاهری شمش‌های W1-W7 عیوب مختلف در هر یک از آن‌ها مشخص شده و در شکل ۳ آمده است: با توجه به شکل ۲ و نتایج حاصل از بررسی شمش‌های W1 و W3 در شکل ۳، مشخص گردید که علی‌رغم وقوع عیب سردجوشی در شمش W3، این عیب در شمش W1 مشاهده نشد. یکی از عوامل مؤثر در تشدید این عیب، دمای نسبتاً پایین ذوب‌ریزی (1380°C) در شمش W3 نسبت به سایر شمش‌ها ارزیابی می‌شود. با این حال، طراحی تغذیه‌ی باز در شمش W1 نقش مؤثری در جلوگیری از شکل‌گیری عیب سردجوشی ایفا کرده است. تحلیل مکانیزم وقوع این پدیده نشان می‌دهد که برخورد مذاب با بخش استوانه‌ای متراکم از ماسه‌تر در قالب، منجر به تولید حجم قابل‌توجهی از گاز در ناحیه مذکور می‌گردد. این



شکل ۳- تصویر شمش‌های W1-W7 به منظور بررسی عیب سردجوشی

شدن انجماد احتمال وقوع عیب کشیدگی کاهش می‌یابد. علی‌رغم اینکه در بررسی عیوب ریخته‌گری در مواردی عیوب انقباضی مانند کشیدگی با عیوب حاصل از حبس گاز مانند حفرات گازی به دلیل ظاهر نسبتاً مشابه موجب تشخیص اشتباه می‌گردد، بررسی ظاهری عیب در تصاویر SEM و تحلیل شیمیایی عیب به کمک نتایج EDS نشان داد که عیب به وجود آمده از نوع کشیدگی است.

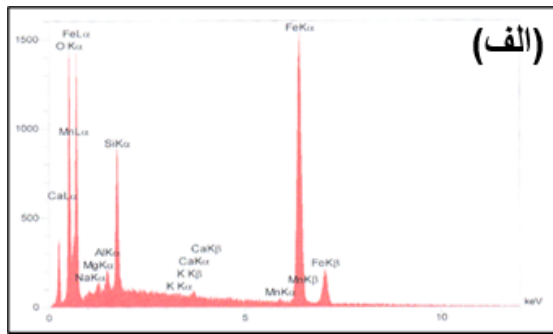
همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، حفره موجود دارای ظاهری نامنظم و دندریتی است در حالی که در حفرات گازی شکل، حفره گرد یا بیضی و با سطح به نسبت صاف است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عیب به وجود آمده از نوع انقباضی است. همچنین نتایج EDS نیز تایید می‌کند که حفره به وجود آمده در قطعه از جنس کشیدگی است. در آنالیز شیمیایی حفرات انقباضی معمولاً مقدار قابل توجهی اکسیژن یافت می‌شود زیرا اکسیدهای سیلیسیم، منیزیم و حتی آهن درون حفره تجمع می‌کنند. همچنین ممکن است مقادیری سولفید منیزیم نیز دیده شود. اما در حفرات گازی مقادیر اکسیژن کم یا تقریباً صفر است. همچنین معمولاً منیزیم نیز دیده نمی‌شود.

جلوگیری از بروز عیب سردجوشی محسوب می‌شود، اما در شرایطی که به دلایل متالورژیکی نیاز به ذوب‌ریزی در دمای پایین وجود دارد، حفظ کربن معادل و جلوگیری از حبس هوا در قالب می‌تواند به‌طور مؤثری احتمال وقوع این عیب را کاهش دهد.

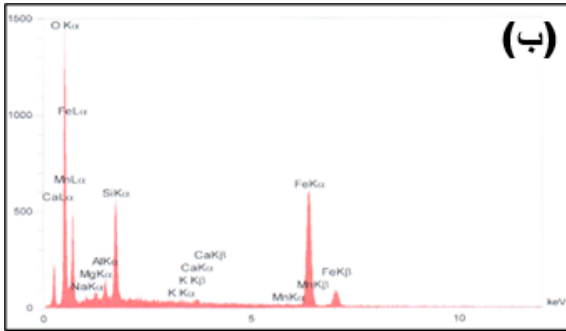
بر اساس نتایج حاصل از بررسی عیب کشیدگی در شمش‌های W1 تا W7، مشخص شد که شمش‌های W1، W2، W4 و W6 دارای نشانه‌هایی از این عیب هستند. مقایسه این شمش‌ها با سایر شمش‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای ذوب‌ریزی از 1380°C به 1440°C ، احتمال وقوع کشیدگی را افزایش می‌دهد. با افزایش دمای مذاب، میزان انقباض در حین کاهش دما بیشتر شده و جبران انقباض‌های بیشتر، مشکل‌تر و باعث افزایش احتمال وقوع کشیدگی خواهد شد. در دماهای پایین‌تر (1380°C)، بررسی شمش‌های W2 و W3 نشان می‌دهد که قرارگیری کربن معادل در محدوده یوتکتیک تأثیر قابل توجهی در کاهش احتمال بروز کشیدگی دارد. این موضوع بیانگر نقش کلیدی ترکیب شیمیایی مذاب در کنترل رفتار انجماد و جلوگیری از عیوب ریخته‌گری است. از لحاظ متالورژیکی هر چه کربن معادل به محدوده یوتکتیک نزدیک شود، دامنه انجمادی کوتاه‌تر و انجماد خمیری به پوسته‌ای تغییر می‌کند، با پوسته‌ای



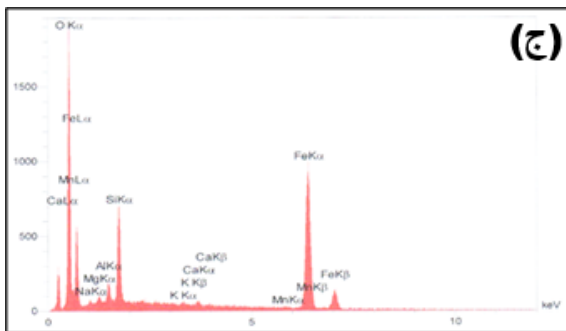
شکل ۴- تصاویر کشیدگی میکرو در شمش‌های تولید شده (الف) W1 (ب) W3 (ج) W4 و (د) W6



عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
O	20.87	Na	0.28	Mg	0.43	Al	0.76
Si	5.29	K	0.08	Ca	0.28	Mn	0.30
Fe	71.71	-	-	-	-	-	-



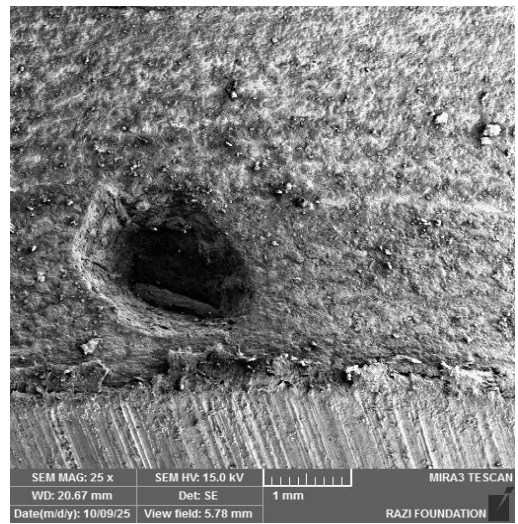
عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
O	35.99	Na	0.71	Mg	0.76	Al	1.26
Si	6.14	K	0.13	Ca	0.34	Mn	0.21
Fe	54.46	-	-	-	-	-	-



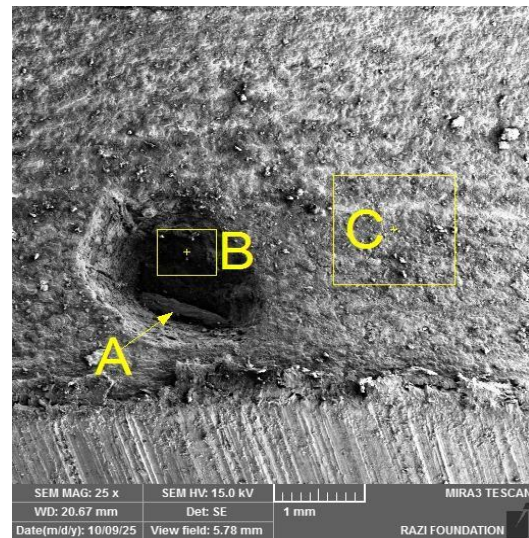
عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
O	33.22	Na	0.45	Mg	0.47	Al	1.06
Si	5.31	K	0.12	Ca	0.35	Mn	0.23
Fe	58.79	-	-	-	-	-	-

شکل ۷- نتایج حاصل از EDS از مناطق A، B و C در شکل ۶

دما بر تعداد کره‌های گرافیت نیز نشان داد که با افزایش دما از ۱۳۸۰ به ۱۴۴۰°C، تعداد کره‌های گرافیتی از حدود ۱۲۵ عدد به ۶۰ عدد (در بزرگنمایی ۱۰۰x و سطح ۱ mm²) رسید (شکل ۸ و ۱۰). دلیل این امر کاهش قابلیت جوانه‌زایی در دمای بالا، از بین رفتن برخی جوانه‌ها در اثر انحلال مجدد و کاهش عناصر جوانه‌زا به دلیل تبخیر یا واکنش با اکسیژن بود. همچنین همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش دمای ذوب‌ریزی اندازه کره‌های گرافیتی افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق، هسته‌زایی کمتر در دماهای بالاتر است که به واسطه قرار گرفتن مذاب در زمان بیشتر در محدوده فوق ذوب احتمال تشکیل



شکل ۵- تصویر SEM از عیب کشیدگی میکرو



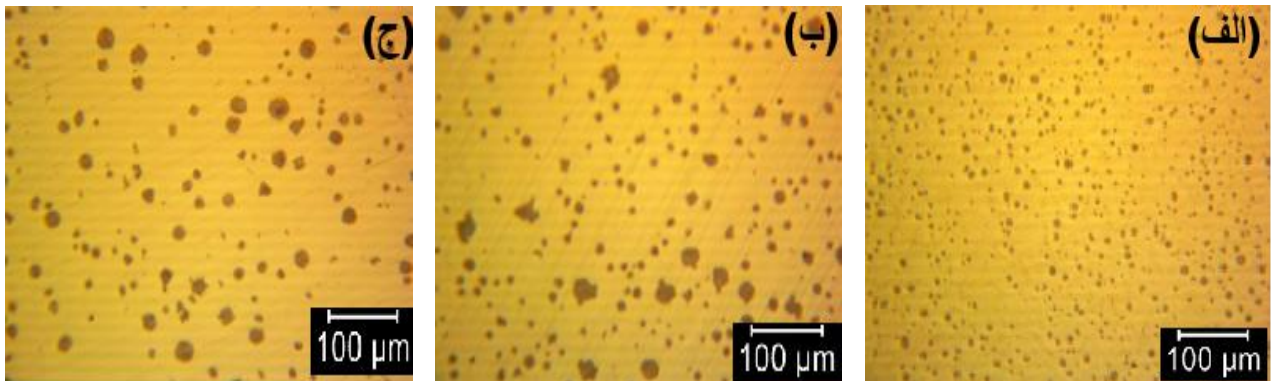
شکل ۶- نقاط مشخص شده در تصویر SEM جهت آنالیز EDS

بررسی نتایج آمده در شکل ۶ و ۷ نیز این موضوع را تایید می‌کند به طوری که در نقاط A و B از شکل ۵ که در داخل حفره بودند، پیک اکسیژن بسیار قوی بوده و درصد وزنی اکسیژن به دست آمده در این نقاط به ترتیب ۲۰ و ۳۵ بود. این نتیجه با تحلیل از پیش بیان شده که حفرات انقباضی دارای مقادیر قابل توجهی اکسیژن می‌باشند کاملاً در تطابق است. همچنین مطابق با پیش بینی صورت گرفته، مقادیری آهن، سیلیسیم و منیزیم نیز یافت شد.

در بررسی که روی تاثیر دما بر کرویت و تعداد کره‌ها انجام شد مشخص شد که با افزایش دما از ۱۳۸۰°C به ۱۴۴۰°C میزان کرویت از ۹۶ درصد به ۸۶ درصد کاهش یافت (شکل ۸ و ۹). دلیل این امر می‌تواند تبخیر منیزیم در دمای بالا و ضعیف شدن خاصیت کرویت سازی باشد که منجر به افزایش تمایل گرافیت‌ها به رشد کرمی شکل یا ورقه‌ای می‌گردد. از سوی دیگر اثر افزایش

هسته‌ها کاهش می‌یابد. در حالی که در دمای پایین‌تر، تحت

تبرید بالاتر

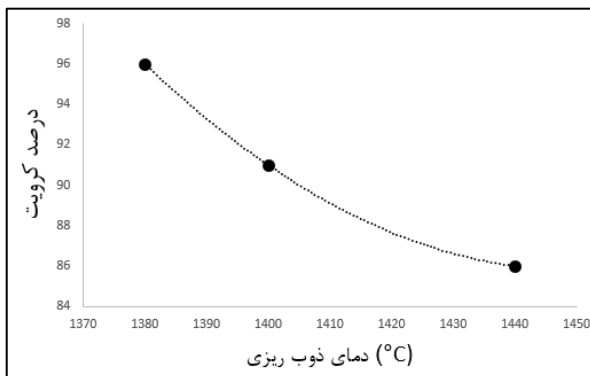


شکل ۸- تصاویر متالوگرافی از شمش‌های ریخته‌گری شده در دماهای مختلف الف) ۱۳۸۰ (ب) ۱۴۰۰ و ج) ۱۴۴۰°C

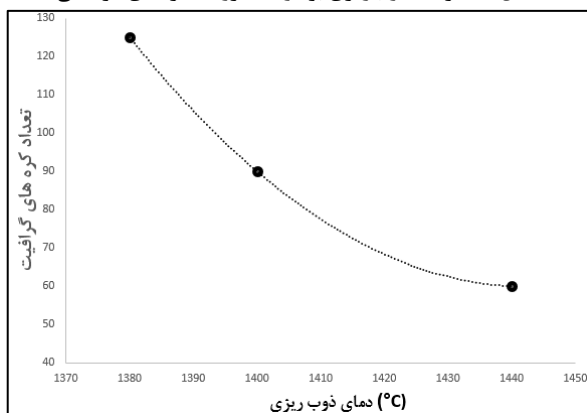
۳- با استفاده از تغذیه باز احتمال وقوع کشیدگی و سرد جوشی کاهش یافت.

۴- با افزایش دما از ۱۳۸۰ به ۱۴۴۰ °C تعداد کره‌های گرافیتی از ۱۲۵ به ۶۵ کاهش یافت.

۵- با افزایش دما از ۱۳۸۰ به ۱۴۴۰ °C درصد کرویت گرافیت‌ها از ۹۶ به ۸۶ درصد کاهش یافت.



شکل ۹- اثر دما ذوب‌ریزی بر درصد کرویت کره‌های گرافیتی



شکل ۱۰- اثر دما ذوب‌ریزی بر تعداد کره‌های گرافیتی

و در نتیجه، هسته‌زایی بیشتر و تعداد کره‌ها بیشتر و کوچک‌تر می‌شود. از طرفی، دمای ذوب ریزی بالاتر، سبب زمان انجام طولانی‌تر و فرصت رشد بیشتر گرافیت می‌گردد. لذا کره‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. همچنین دمای زیاد باعث تجزیه برخی ترکیبات و افزایش اکسیژن فعال می‌شود که باعث کاهش هسته‌های فعال می‌شود و منجر به کاهش تعداد کره‌ها و افزایش اندازه آن می‌شود. از طرف دیگر افزایش دما منجر به میرایی مقادیر بیشتری از جوانه‌زها می‌شود. بنابراین تعداد کره‌ها کاهش یافته و منجر به افزایش اندازه کره‌ها می‌شود.

در شرایطی که به دلایل متالورژیکی، نظیر جلوگیری از عیب جلوگیری از وقوع عیب سردجوشی، نیاز به افزایش دمای ذوب‌ریزی وجود دارد، می‌توان با طراحی تغذیه مناسب و حفظ کربن معادل در محدوده یوتکتیک، از بروز کشیدگی جلوگیری کرد. البته، در صورت انتخاب دماهای پایین برای ذوب‌ریزی نیز، حفظ کربن معادل در محدوده مذکور ضروری است تا از ایجاد سرد جوشی جلوگیری شود. زیرا یا نزدیک‌تر شدن هر چه بیشتر به نقطه یوتکتیک، دمای لیکوئیدوس کاهش یافته و میزان مذاب بیشتری به صورت یوتکتیک منجمد می‌شود که سیالیت آن افزایش می‌یابد. در نتیجه احتمال وقوع سرد جوشی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در هر شرایطی نزدیک شدن به یوتکتیک هم احتمال بروز کشیدگی متمرکز و هم احتمال بروز سرد جوشی کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دما احتمال وقوع عیب سرد جوشی کاهش و احتمال وقوع عیب کشیدگی افزایش یافت.

۲- با نزدیک شدن مقدار کربن معادل به ۴.۳ درصد وزنی، احتمال وقوع عیوب سرد جوشی و کشیدگی کاهش یافت.

مراجع

- graphite cast irons, *Metals*, 2022, 12(3) 504, DOI: 10.3390/met12030504.
- [20] Chatrad B., et al., A Study on minimization of critical defects in casting process considering various parameters, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, 5(5) 9.
- [21] Jadhav B.R., Jadhav S.J., Investigation and analysis of cold shut casting defect and defect reduction by using 7 quality control tools, *International Journal of Advanced Engineering Research and*, 2013, 28-30.
- [22] Feng, Y.-s., D.-M. Liao, and T. Chen, Confluence and cold shut computation based on time field in casting simulation, *China Foundry*, 2021, 18(2) 101-109.
- [1] Stefanescu D.M., Solidification and modeling of cast iron—A short history of the defining moments, *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 413-414, 322-333.
- [2] Hellström K., Diószegi A., Diaconu L., A broad literature review of density measurements of liquid cast iron, *Metals*, 2017, 7(5) 165.
- [3] Campbell J., Index, in *Complete Casting Handbook (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann: Boston, 2015, 993-1028.
- [4] Kweon E., et al., Computational modeling of shrinkage porosity formation in spheroidal graphite iron: a proof of concept and experimental validation, *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14.
- [5] Valipour M., Khayat K.H., Coupled effect of shrinkage-mitigating admixtures and saturated lightweight sand on shrinkage of UHPC for overlay applications, *Construction and Building Materials*, 2018, 184, 320-329.
- [6] Xu C., et al., Shrinkage effect and mechanical performance of steel-ultra-high performance concrete composite deck under negative bending action, *Engineering Structures*, 2022, 273, 115025.
- [7] Bommanna, C., et al., Investigation of shrinkage defect in castings by quantitative ishikawa diagram, *Archives of Foundry Engineering*, 2017, 17(1)174-178.
- [8] Kanno T., Effect of pouring temperature, composition, mould strength and metal flow resistance on shrinkage cavities in spheroidal graphite cast iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, 21, 2-6.
- [9] Ghassemali E., Jarfors A.E.W., Diószegi A., On the formation of micro-shrinkage porosities in ductile iron cast components, *Metals*, 2018, 8 8(7) 551, DOI: 10.3390/met8070551.
- [۱۰] دیواندری م.، نیکوکار ح.، بختیاری ر.، بهینه‌سازی شاخص حلالیت منیزیم در تولید چدن نشکن به روش افزودن در راهگاه. پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۳۹۸، ۳(۱) ۳۷-۴۳.
- [۱۱] لیمویی، م.ب.، et al.، اثر جوانه‌زاهای پایه سیلیسیم و باریم روی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات ریختگی چدن نشکن فریتی. پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۴۰۰، ۵(۳) ۲۱۵-۲۲۲.
- [۱۲] پیرنجم الدین ن.، محمدصادقی ب.، بوتراپی س.م.ع.، تأثیر افزودن آنتیموان و مدول ریختگی بر مورفولوژی گرافیت، ریزساختار و خواص مکانیکی چدن نشکن. پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۴۰۰، ۵(۲) ۶۷-۷۷.
- [13] Zhao, L., et al., Effect of Pouring and Preheating Temperature on Shrinkage Cavity and Porosity Defects of Nickel-Based Cast Superalloy, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2025, 56(2) 1316-1333.
- [۱۴] رحیم‌پور بصرا ر.، ترابی کفشگری م.، عباسی م.، تأثیر جوانه‌زا و مدول ریختگی بر ریزساختار انجمادی چدن آستنیتی منگنزی با گرافیت کروی. پژوهشنامه ریخته‌گری، ۱۴۰۰، ۵(۱) ۱۹-۳۰.
- [15] Singh S., Khanna D.R., Sharma D.N., Study and control of factors influencing casting shrinkage using DOE and numerical simulation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 624(1) 012021.
- [16] Shabestari S.G., Moemeni H., Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153, 193-198.
- [17] Library. *MRS Bulletin*, 2003, 28(9) 674-675.
- [18] Wang T., Yao S., Research of feeding effect of ductile cast iron under different riser conditions, *Metals*, 2022, 12, 412.
- [19] Sertucha J., Lacaze J., Casting defects in sand-mold cast irons—an illustrated review with emphasis on spheroidal



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

The Effect of Metallurgical Parameters on Casting Defects of Ductile Iron

Hesam Noormohammadi Omran¹, Peiman Omranian Mohammadi^{2*}

1. M.Sc. in Materials Engineering, Department of Engineering, FZA Company, Amol, Mazandaran, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Chemistry, Polymer and Material Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran.

* Corresponding author, pomranian@bzte.ac.ir

Paper history:

Receive Date: 25 October 2025

Revise Date: 10 November 2025

Accept Date: 29 November 2025

Keywords:

Pouring temperature,
Equivalent carbon,
Feeding,
Shrinkage hole,
Cold shut

Abstract:

In this research, to investigate the effect of metallurgical parameters such as pouring temperature, equivalent carbon and feeding conditions on the metallurgical quality of ductile iron parts (absence of shrinkage hole and cold shut defects), a bell-shaped piece used in the suspension system of automobile parts was used. For this purpose, equivalent carbon from 4.3 to 4.5 wt%, pouring temperature from 1380 to 1440°C and feeding in three conditions of no feeding, closed feeding and open feeding were investigated. In order to reduce the number of experiments, the Taguchi method was used to design the experiments. The results of the experiments showed that equivalent carbon of nearly 4.3 wt%, high pouring temperature for cold shut and low pouring temperature for shrinkage hole defects and the use of open feeding conditions provided the most suitable conditions so that none of the shrinkage hole and cold shut defects were observed under these conditions.

[Please cite this article using:](#)

Hesam Noormohammadi and Peiman Omranian Mohammadi, The Effect of Metallurgical parameters on Casting Defects of Ductile Iron, in Persian, Founding Research Journal, 2025, 9(2) 212-129.

DOI: 10.22034/frj.2025.553160.1213

Journal homepage: www.foundingjournal.ir